DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161078

廖仁郡, 陈玉成. 重庆市规模化畜禽养殖氨排放特征及减排策略研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 769−777
Liao R J, Chen Y C. Characteristics of ammonia emission from large-scale livestock/poultry breeding and its mitigation countermeasures in Chongqing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 769−777

重庆市规模化畜禽养殖氨排放特征及减排策略研究*

廖仁郡, 陈玉成**

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室/西南大学资源环境学院 重庆 400716)

摘 要: 随着空气质量和畜禽养殖污染问题日益严峻, 快速发展的规模化畜禽养殖面临的环境压力不断增大, 明确规模化畜禽养殖的氨排放量及其排放特征, 可为大气环境管理和畜禽养殖污染防治提供科学依据及对策。本文根据重庆市规模化畜禽养殖业氨排放系数和活动水平数据, 估算了重庆市 2013 年规模化畜禽养殖业氨排放量, 分析氨排放特征, 并探讨了相应的氨减排措施。结果表明, 2013 年重庆市规模化畜禽养殖氨排放总量为 17 102.92 t, 排放强度为 0.21 t·km^{-2}; 合川、丰都和潼南依次是规模化畜禽养殖业氨排放量最大的 3 个区县, 排放份额共占总排放量的 30.19%; 从空间分布特征来看, 璧山区为氨排放强度最大的区县, 其排放强度为 1.17 t·km^{-2}, 氨排放强度最小的是城口县, 为 0.01 t·km^{-2}; 在全局空间区域上, 重庆市规模化畜禽养殖氨排放空间分布存在显著的空间正相关; 局部空间区域上有 4 个区县呈现“高-高”类型区, 5 个区县呈现“低-低”类型区, 没有出现“高-低”或“低-高”类型区。规模化生猪养殖是重庆市畜禽养殖业最大的氨排放贡献源, 排放量达 9 538.63 t, 贡献率为 55.80%; 其次是蛋鸡, 其贡献率为 15.87%。畜禽在圈舍、储存管理和后续利用(施肥)3 个阶段的氨排放量不同, 家禽在圈舍阶段的氨排放贡献率均超过 60%, 其次是后续利用(施肥)阶段, 尿粪储存阶段氨排放量最小; 家畜氨排放贡献率最高的是后续利用(施肥)阶段, 其次是圈舍内的排放, 储存阶段释放的氨量很少。奶牛养殖是减排的重点控制源, 规模化畜禽养殖主要减排措施包括低氮饲料喂养、畜舍改造、粪便加盖或密封以及粪肥注施等。

关键词: 规模化畜禽养殖; 氨排放; 管理阶段; 减排措施; 重庆

中图分类号: X821 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)05-0769-09

Characteristics of ammonia emission from large-scale livestock/poultry breeding and its mitigation countermeasures in Chongqing*

LIAO Renjun, CHEN Yucheng**

(Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education / College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: With environmental concerns raised on air quality and livestock/poultry industries, there has been an increasing pressure on rapidly developing large-scale livestock/poultry breeding to take actions to mitigate these concerns. As such, it was necessary to explore ammonia emission from large-scale livestock/poultry industries and its characteristics for management of air quality and prevention of livestock/poultry pollution driven by sound scientific knowledge and countermeasures. With data on ammonia emission from large-scale livestock/poultry breeding and the related coefficients, this study calculated the amount of ammonia emission in 2013 in large-scale livestock/poultry breeding in Chongqing. The paper also analyzed the characteris-

* 国家科技支撑计划项目(2015BAL04B01)资助
** 通讯作者: 陈玉成, 主要研究方向为农业生物环境与能源工程。E-mail: chenyucheng@swu.edu.cn
廖仁郡, 主要研究方向为畜禽养殖污染防治。E-mail: 568326350@qq.com
收稿日期: 2016-11-29 接受日期: 2017-01-04
* This work was supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2015BAL04B01).
** Corresponding author, E-mail: chenyucheng@swu.edu.cn
Received Nov. 29, 2016; accepted Jan. 4, 2017

tics of ammonia emission and the corresponding mitigation countermeasures for large-scale livestock/poultry breeding. The results showed that total ammonia emission from large-scale livestock/poultry breeding in Chongqing was 17 102.92 t in 2013 and the emission intensity was 0.21 t·km^{-2}. Hechuan, Fengdu and Tongnan were the top three counties for ammonia emission, with their contribution accounting for 30.19% of the total ammonia emission. Jiangbei County had the least ammonia emission in Chongqing. Ammonia emission intensity for Bishan County was the highest, followed by Hechuan County, with respective emission intensity of 1.17 t·km^{-2} and 1.09 t·km^{-2}. Chengkou County had the least, with emission intensity of 0.01 t·km^{-2}. Based on the spatial distribution characteristics, there was significant spatial auto-correlation in the spatial distribution of ammonia emission from large-scale livestock/poultry breeding industries in Chongqing. Through localized spatial auto-correlation analysis, it was noted that four counties belonged to high-high type, five counties belonged to low-low type and none belonged to high-low type or low-high type of spatial distribution of ammonia emission. Pig breeding was the highest contributor to ammonia emission, with 9 538.63 t of emitted ammonia which accounted for 55.80% of total large-scale livestock/poultry breeding emission. Then layer breeding accounted for 15.87% and broiler breeding (with the least value) accounted for 6.68% of ammonia emissions. Ammonia emissions from livestock and poultry manure differed in the stages of animal house, storage and utilization of manure. For poultry, ammonia emissions of stage in breeding house were the dominant of overall stages, with a contribution rate of over 60%. For livestock, however, ammonia emission contribution rate at utilization stage was the highest. In order to reduce emissions, it was need to focus on management of dairy cattle breeding. Such management countermeasures included the use of feed stocks with low ammonium content, renovation of stable, covered or sealed manure, and injection application of manure.
Keywords: Large-scale livestock/poultry breeding; Ammonia emission; Management stage; Mitigation countermeasure; Chongqing

氨(NH_3)是参与大气氮循环的关键成分之一[1]，也是形成细颗粒$PM_{2.5}$的重要前体物质，与大气中SO_2和NO_x等结合反应生成硝酸铵、硫酸铵等二次颗粒，从而降低城市能见度，引发灰霾[2]。NH_3作为大气中重要的碱性物质，在底层大气环境酸化中起到缓冲作用，是大气酸沉降的重要组成部分[3]。此外，NH_3排放到大气中还会破坏甲烷氧化加剧温室效应[4]，进入到地表水又会导致水体富营养化[5]。

随着大气污染日益突出，国内外学者日益关注氨的排放特征和排放因子的研究[6-9]，发现畜禽养殖是氨的主要排放源。2011年欧洲农业源氨排放量占总排放量的93.7%，其中80%~90%来自于畜禽养殖[10]；2011年美国氨排放总量为392万t，其中农业源占排放总量的81.8%，畜禽养殖占54.3%[11]。我国学者研究表明，2006年中国氨排放中畜禽动物氨排放量最大，占总量的40.79%[12]；长三角地区2004年畜禽养殖的氨排放量占总排放的44.1%[13]；北京市2012年畜禽养殖业产生的氨为4.43万t，平均氨排放强度为2.70 t·km^{-2}[14]；四川省2012年畜禽养殖是最主要的人为排放源，占总排放量的63.31%，尤其是生猪和牛[15]。现有的研究主要集中在较大尺度(国家级或省级)氨源排放清单及排放特征分析上，少有专门针对畜禽养殖业氨排放的研究，缺乏根据排放特征对污染源减排措施的探讨研究。在氨的减排方面，欧洲研究最早，其减排技术已成熟应用于养殖实践[16]，而国内却少有相关研究[17]，仅有少数学者根据欧洲、美国的农业源氨排放减排的经验技术，并结合我国实际，提出了我国农业源的氨排放控制框架以及畜禽养殖方面可采取的减排措施[18]。

近年来，重庆市畜禽养殖业发展迅速，2013年畜牧业总产值4.8×10^{10}元，占农业总产值的31.89%[19]，由此带来的氨排放量也日益增大，造成了较严重的氨污染。但相应的研究仅限于张灿等[20]的报道，即农业源氨排放中化肥施用氨排放量最大(占总排放量的66.7%)，其次是畜牧养殖业(占26.3%)。随着畜牧业的不断发展，畜禽养殖向规模化、集约化方向迅速发展，但管理模式和技术相对不够完善，规模化养殖业带来的环境压力日益增加。为此，本文综合近年来国内外的研究成果，估算2013年重庆市规模化畜禽养殖业氨排放量，分析其空间分布特征，根据规模化畜禽养殖排放特征和粪便处理方式差异，探讨了不同措施下氨的减排效率并提出适合重庆市的减排措施建议，以期为重庆市大气环境管理及规模化畜禽养殖污染防治提供科学依据及对策。

1 研究方法

1.1 研究区域和对象

以 2013 年为基准年，研究区域为重庆市具有规模化畜禽养殖业的 36 个区县，涉及都市功能核心区、都市功能拓展区、城市发展新区、渝东北生态涵养发展区和渝东南生态保护发展区五大功能区，估算的排放源包括规模化蛋鸡、肉鸡、奶牛、肉牛和生猪养

殖场。

1.2　数据来源

畜禽养殖数据(畜禽年底存栏数、年出栏数)来源于重庆市 2013 年开展的“四清四治”专项活动得到的统计数据。排放因子主要参考《大气氨源排放清单编制技术指南》(试行)[21]，并结合重庆市养殖的具体情况予以确定。

1.3　估算方法

规模化畜禽养殖业中氨排放主要由动物的排泄物释放。动物的排泄物在圈舍中一般会停留一段时间，然后汇集进行储存腐熟处理，最后进行后续利用(施肥)。因此规模化养殖畜禽粪便管理阶段包括粪便圈舍、储存处理和后续利用(施肥)，这 3 个阶段粪便具有尿液(液态)和粪便(固态)两种形式。氨排放计算公式为：

$$E = \sum_{i,j}(A_{i,j} \times F_{i,j} \times 1.214) \tag{1}$$

$$E_I = E/S \tag{2}$$

式中：E 为氨排放量，t；A 为活动水平，t；F 为排放系数，%TAN(单位质量总铵态氮中以大气氨形式排放的氮的百分比)；1.214 为 NH_3-N 与 NH_3 转换系数；E_I 为氨排放强度，t·km^{-2}；S 为国土面积，km^2；i 代表不同畜禽种类；j 代表粪便不同管理阶段，包括尿粪圈舍、储存处理和后续利用(施肥)。

1.3.1　氨排放系数的确定

排放系数为单位质量总铵态氮(TAN)中以大气氨形式排放的氮的量。结合重庆市规模化畜禽养殖业的实际情况[22]，从《大气氨源排放清单编制技术指南》中确定畜禽养殖各个阶段的排放系数[21](表 1)。由于计算粪便后续利用过程的活动水平时需要考虑粪便存储过程中氮的损失(以 N_2O、NO 和 N_2 形式释放)，因此，粪便存储过程中 N_2O、NO 和 N_2 的排放系数在表 1 中一并列出。

1.3.2　活动水平(A_{ij})的确定

活动水平为畜禽粪便在不同管理阶段、不同形态粪便的总铵态氮量。粪便圈舍、储存处理和后续利用(施肥)3个阶段的总铵态氮量与室内排泄物铵态氮量(TAN)有关，粪便形态区分为液态和固态，具体计算方法如下：

$$\text{TAN}_{室内} = 畜禽年内饲养量 \times 单位畜禽排泄量 \times 含氮量 \times 铵态氮比例 \tag{3}$$

$$A_{圈舍} = \text{TAN}_{室内} \times X_{液} \tag{4}$$

表 1　规模化畜禽养殖不同粪便管理阶段排泄物氨排放系数

Table 1　Ammonia emission factors from animal excrements of large-scale livestock/poultry breeding at different manure management stages　%TAN

畜禽种类 Livestock and poultry	圈舍阶段 In breeding house		储存阶段 Storage								利用阶段 Manure	
			尿液 Urine				粪便 Faeces					
	尿液 Urine	粪便 Faeces	NH_3	N_2O	NO	N_2	NH_3	N_2O	NO	N_2	尿液 Urine	粪便 Faeces
蛋鸡 Layer	0.0	35.9	0.0	0.0	0.00	0.0	3.7	4	1	30	0	63
肉鸡 Broiler	0.0	40.3	0.0	0.0	0.00	0.0	0.8	3	1	30	0	63
奶牛 Cow	14.0	14.0	15.8	1.0	0.01	0.3	4.2	8	1	30	55	79
肉牛 Beef	14.0	14.0	15.8	1.0	0.01	0.3	4.2	8	1	30	55	79
生猪 Pig	18.5	18.5	3.8	0.0	0.01	0.3	4.6	5	1	30	40	81

$$A_{储存} = A_{圈舍} - \left(A_{圈舍} \times \text{EF}_{圈舍}\right) \tag{5}$$

$$A_{施肥} = \left[A_{圈舍} - \left(A_{圈舍-液态} \times \text{EF}_{圈舍} + A_{储存} \times \text{EF}_{储存} + \text{EN}_{\text{N},损失}\right)\right] \times (1-R) \tag{6}$$

$$\text{EN}_{\text{N},损失-液态} = \left(A_{圈舍-液态} - A_{圈舍-液态} \times \text{EN}_{圈舍-液态}\right) \times \left(\text{EF}_{储存-液态-N_2O} + \text{EF}_{储存-液态-NO} + \text{EF}_{储存-液态-N_2}\right) \tag{7}$$

$$\text{EN}_{\text{N},损失-固态} = \left(A_{圈舍-固态} - A_{圈舍-固态} \times \text{EN}_{圈舍-固态}\right) \times f \times \left(\text{EF}_{储存-固态-N_2O} + \text{EF}_{储存-固态-NO} + \text{EF}_{储存-固态-N_2}\right) \tag{8}$$

式中：$\text{TAN}_{室内}$为室内排泄粪便铵态氮的量，t；$A_{圈舍}$、$A_{储存}$、$A_{施肥}$分别为粪便圈舍、储存处理和后续利用(施肥)的活动水平，t；$X_{液}$为液态粪肥占总粪肥的质量比重，取50%；R为粪肥用作生态饲料的比重(比如鸡粪可作为养鱼饲料)；$\text{EF}_{圈舍}$和$\text{EF}_{储存}$分别为粪便圈舍、储存处理的氨排放系数(包括液态、固态)，TAN%；$\text{EF}_{储存-液态-N_2O}$、$\text{EF}_{储存-固态-N_2O}$、$\text{EF}_{储存-液态-NO}$、$\text{EF}_{储存-固态-NO}$、$\text{EF}_{储存-液态-N_2}$、$\text{EF}_{储存-固态-N_2}$ 分别为粪便的固态和液态在存储过程中N_2O、NO和N_2的排放系数；$\text{EN}_{\text{N},损失_液态}$和$\text{EN}_{\text{N},损失_固态}$分别为存储过程中氮的损失量，t；$f$为固态粪便存储过程中总铵态氮向有机氮转化的比例，取10%。畜禽排泄量、含氮量等[21]相关参数详见表2，饲养周期采用重庆地区畜禽养殖周期修正后的数据[22]。蛋鸡、奶牛和肉牛饲养周期大于1年的，年内饲养量按年底存栏数计算，对于肉鸡、肉用家禽饲养周期小于1年，年内饲养量按年出栏量计算。

表 2 畜禽粪便铵态氮量估算的相关参数
Table 2 Parameters of ammonium nitrogen estimation of livestock and poultry manure

畜禽种类 Livestock and poultry	周期 Cycle (d)	单位畜禽排泄量 Excretion of per livestock and poultry (kg·d^{-1}·head^{-1})		含氮量 Nitrogen content (%)		铵态氮比例 Ammonium nitrogen ratio (%)	生态饲料比重 Proportion of ecological feed (%)
		尿液 Urine	粪便 Faeces	尿液 Urine	粪便 Faeces		
蛋鸡 Layer	365	—	0.12	0.00	1.63	70	50
肉鸡 Broiler	52	—	0.09	0.00	1.63	70	50
奶牛 Cow	365	12.89	30.67	0.90	0.38	60	20
肉牛 Beef	365	8.34	15.67	0.90	0.38	60	20
生猪 Pig	122	3.36	2.04	0.40	0.34	70	30

“—”表示禽类排泄物没有尿液。“—” is the excrement of poultry without urine.

1.4 空间自相关分析

空间自相关是指同一个变量在不同空间位置上的相关性，是空间单元属性值聚集程度的一种度量，主要用来分析空间数据的统计分布规律[23]，通常采用的统计指标为 Moran’s I 指数。空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关两部分。

1.4.1 全局空间自相关

空间自相关用于探测整个研究区域的空间模式，使用单一的值来反映该区域的自相关程度，能够直观描述属性在总体空间内是否存在有集聚性状态，但不能明确指出具体的集聚区域。区域总体的空间关联与空间差异程度采用全局 Moran’s I 指数进行衡量。计算公式如下：

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}W_{ij}\left|x_i-x\right|\left|x_j-x\right|}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}\left|x_j-x\right|^2} \tag{9}$$

式中：I 为全局 Moran’s I 指数，n 表示测度区域的个数，x_i 和 x_j 分别表示区域 i、j 地理单元上的属性值，x 为各区域属性值的平均值；W_{ij} 是定义地理单元 i 和 j 的之间空间关系的权重矩阵。Moran’s I 的取值在［−1, 1］区间内，其为正值时表示空间事物的属性取值是趋于集聚的，为负值表示空间事物的属性取值是趋于分散的，Moran’s I 取值为 0 时表示空间事物的属性取值不存在空间自相关性。用 z 检验考察 Moran’s I 是否通过显著性水平检验。

1.4.2 局部空间自相关

局部空间自相关指数用于反映某一空间单元的属性值同其邻接空间单元上同一属性值的相关程度。局部空间关联指数(LISA)是 Moran’s I 指数的局部形式，局部空间自相关的功能除了能够度量区域内空间关联的程度外，更重要的是它能够找出空间聚集点，这在一定程度上弥补了全局自相关分析的不足[24]。计算公式为：

$$I_i=\frac{X_i-\bar{X}}{S}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\left(X_i-\bar{X}\right) \tag{10}$$

式中：N、X、W_{ij} 含义同公式(9)，$S=\sum_{j=1,\,j\neq 1}^{N}X_j^2/(\mathrm{N}-1)-\bar{X}^2$；$I_i$ 的显著性运用 Z 检验，I_i 值为正说明区域单元周围呈现相似值高-高或低-低(H-H 或 L-L)的空间集聚，I_i 值为负说明区域单元周围呈现非相似值高-低或低-高(H-L 或 L-H)的空间集聚。

2 结果与分析

2.1 重庆市各区县规模化畜禽养殖氨排放

由于经济水平、生态环境条件及农牧业结构的差异，重庆市各区县规模畜禽养殖氨排放量有所不同(图 1)。可以看出，合川区、丰都县和潼南区依次是畜禽养殖氨排放最大的 3 个区县，年排放高达 2 563 t、1 491 t 和 1 107 t，其排放份额共占总排放量的 30.19%。合川区是生猪养殖量最高的区县，其氨排放量占全市的 19.76%，且其余畜禽的养殖量相较于其他区县也较高，因此其氨排放量远高于其他区县，占总排放量的 13.49%。九龙坡区、南岸区和江北区由于城市规划与环境保护要求，畜禽养殖业氨排放量较低，分别占总排放量的 0.08%、0.04%和 0.03%；其他区县氨排放量的贡献率为 0.2%~7.8%。

2.2 重庆市不同畜禽氨排放量分布

分析不同畜禽氨排放量，发现生猪养殖是最大的氨排放贡献源，氨排放量为 9 538.63 t，占总排放量的 55.80%(图 2a)。我国自古就有“民以食为天，猪粮安天下”之说，养猪是关系国计民生的大问题，猪肉消费在我国肉类消费中占较大比例。其次为蛋鸡，氨排放量为 2 712.34 t，占 15.87%，尽管蛋鸡粪便的氨排放系数较小[25]，但由于养殖量大，全年出栏 1 579 万羽，因此其氨排放量很大。奶牛和肉牛的氨排放量相近，分别为 1 858.85 t 和 1 840.89 t(占

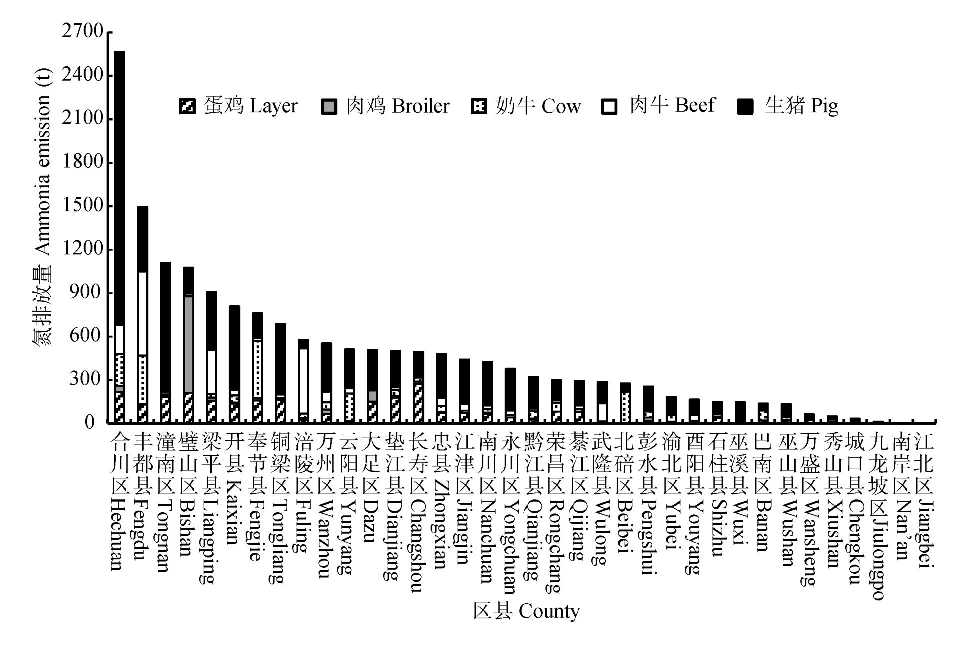


图 1　2013 年重庆市各区县规模化畜禽养殖氨排放量

Fig. 1　Ammonia emissions from large-scale livestock/poultry breeding in different counties of Chongqing in 2013

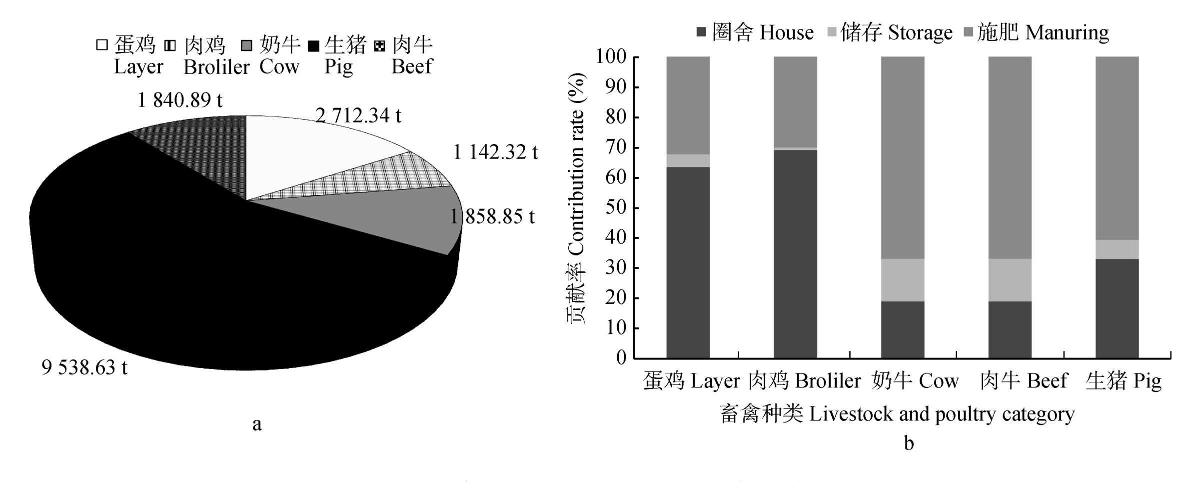


图 2　2013 年重庆市不同畜禽氨排放量(a)和不同粪便管理阶段的氨排放贡献率(b)

Fig. 2　Ammonia emissions from different livestock and poultry categories (a) and contribution rates of ammonia emissions from different manure management stages (b) in Chongqing in 2013

10.87%和 10.77%), 肉鸡的氨排放量最低, 为 1 142.32 t, 占 6.68%。

进一步分析 2013 年重庆市规模化畜禽养殖不同粪便管理阶段氨排放贡献率(图 2b), 发现畜禽粪便在圈舍、储存和后续利用(施肥)3 个阶段的氨排放量不同。对于家禽而言, 在禽舍排泄的粪便产生的氨排放在总过程中占主导地位, 贡献率均超过 60%, 其次是后续利用(施肥)阶段, 粪便储存阶段氨排放量最小; 对于家畜来说, 氨排放贡献率最高的是后续利用阶段, 其次是圈舍内的排放, 粪便的储存阶段释放的氨量也同样很少。

2.3　重庆市畜禽养殖业氨排放空间分布

2.3.1　氨排放强度空间分布

重庆市 2013 年畜禽养殖业氨排放强度为 0.21 t·km^{-2}, 其中璧山区氨排放强度最大, 其次是合川区(图 3), 氨排放强度分别为 1.17 t·km^{-2} 和 1.09 t·km^{-2}, 城口县的排放强度最小, 为 0.01 t·km^{-2}。氨排放强度的空间分布, 与重庆市五大功能区战略相协调, 排放强度较大的区县均属于城市发展新区, 而都市功能区与渝东南生态保护区的氨排放强度都很小。城市发展新区是全市产业的主要区域, 大力发展养殖业等产业, 面临着发展与环境之间的矛盾; 而都市功能区与渝东南生态保护区的很多地区被化定为“禁养区”, 养殖业的污染问题并不是其面临的主要环境问题。

2.3.2　氨排放全局空间自相关

运用 Geoda 空间数据分析软件计算出重庆市 2013 年 36 个区县国土面积比值的全局 Moran’s I 指数, 并对其进行显著性检验。Moran’s I 指数为 0.479 8,

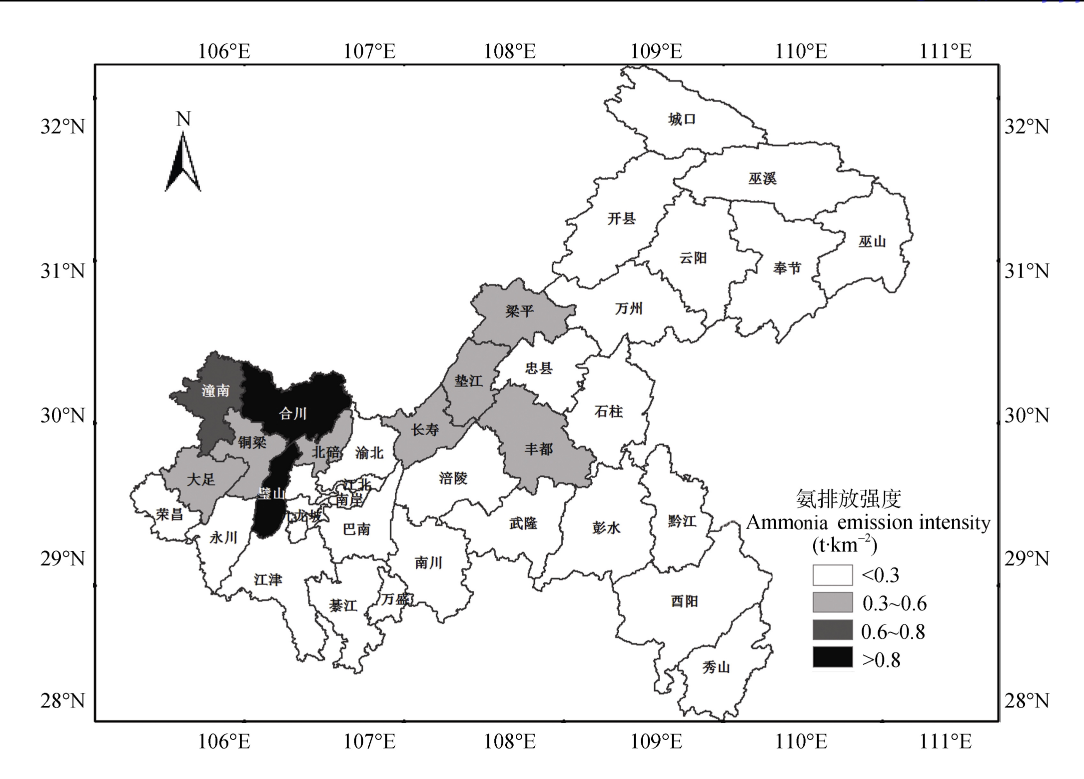


图 3　2013 年重庆市规模化畜禽养殖氨排放强度空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of ammonia emission intensity of large-scale livestock/poultry breeding in Chongqing in 2013

标准化 Z 值为 5.738 9，明显大于检验临界值 1.96，通过显著性水平 α=0.05 的检验，说明重庆市各区县规模化畜禽养殖氨排放呈现出显著的空间正自相关性，表现显著的聚集分布态势，即规模化畜禽养殖氨排放量高的区县其周围区域规模化畜禽养殖氨排放量也高；反之，氨排放量低的区县周围区域氨排放量也低。

2.3.3　氨排放局部自相关

利用 Geoda 空间数据分析软件对重庆市 2013 年 36 个区县规模化畜禽养殖氨排放的局部 Moran's I 指数进行计算，在 α=0.05 的显著性水平下，结合 ArcGIS 9.3 软件，将各空间单元归属的类型与相应的空间进行匹配绘制成 LISA 集聚图，以揭示空间单元与其邻近单元同质和异质的局部特征变化及其地理分布(图 4)。从图中可以看出："高-高"(H-H)类型区集中分布在荣昌区、大足区、铜梁区和潼南区，表明这 4 个区县规模化畜禽养殖氨排放量比较高，且与其周围邻近区域空间差异较小，属于局部均质分布，

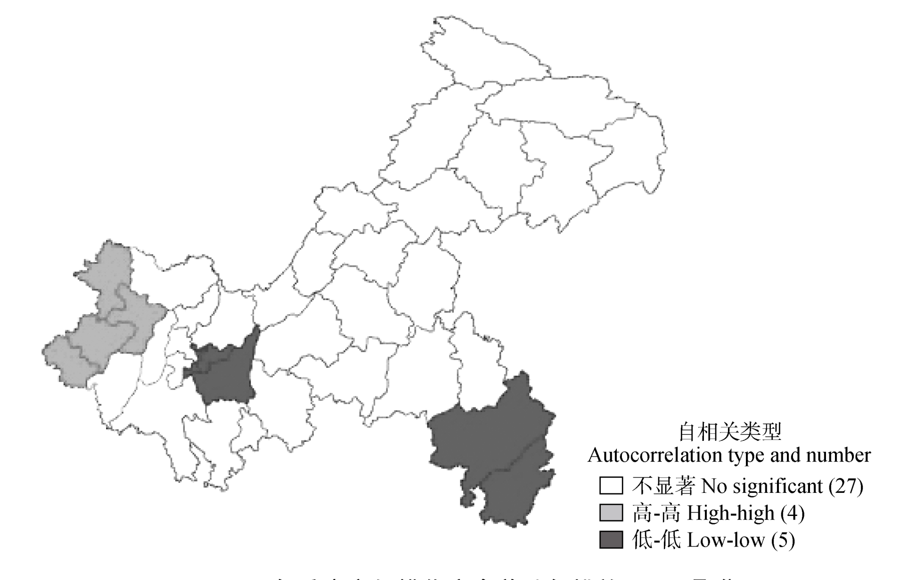


图 4　2013 年重庆市规模化畜禽养殖氨排放 LISA 聚集图

Fig. 4　LISA plots for the ammonia emission of large-scale livestock/poultry breeding in Chongqing in 2013

这几个区县属城市发展新区汇集了重庆市大部分的养殖资源，畜牧业发达；“低-低”(L-L)类型区分布在重庆市主城区及渝东南的酉阳县和秀山县，表明以上区县与其周围区域规模化畜禽养殖氨排放量均偏低，其局部空间差异较小；重庆市规模化畜禽养殖氨排放没有出现“高-低”(H-L)类型区或“低-高”(L-H)类型区。

2.4　规模化畜禽养殖业氨排放减排措施研究

对不同畜禽养殖量与排放量进行回归分析(式12)，可知奶牛养殖是重庆市规模化畜禽养殖业氨排放的最主要影响因子，即每增加 1 头奶牛，氨排放量增加 38.050 kg，因此，在开展畜禽养殖氨排放减排措施研究时奶牛应作为主要研究对象。

$$y = 3.383x_1 + 0.175x_2 + 0.133x_3 + 38.050x_4 + 26.253x_5 \ (R^2 = 0.99) \tag{12}$$

式中：y 代表氨排放总量，x_1、x_2、x_3、x_4、x_5 分别代表生猪、蛋鸡、肉鸡、奶牛、肉牛的年内饲养量。

在畜禽养殖业氨排放的减排中，不同措施下畜禽排放源减排效率不同(表 3)，根据减排效率，可以提出重庆地区规模化畜禽养殖氨减排的主要策略。首先，对氨排放量最大的猪使用低氨饲料进行喂养，对奶牛和肉牛可增加青贮饲料或者玉米喂养的比例。其次，可对畜禽的圈舍进行适当改造，在较大规模的猪舍和鸡舍内安装生物过滤器，保持室内通风。使用加盖容器或者密封储存粪便，减少氨的挥发，尤其是对于猪的粪便。此外，使用畜禽粪便进行后续利用时，采用粪肥注施的方式。

表 3　不同养殖阶段减排措施下畜禽氨排放的减排效率

Table 3　Mitigation efficiencies of ammonia emission from livestock/poultry of different mitigation measures of different breeding stages

阶段 Stage	减排措施 Mitigation countermeasure	减排效率 Mitigation efficiency (%)			参考文献 References
		鸡 Chicken	奶牛 Cow	生猪 Pig	
饲喂 Feeding	低氮饲料 Low N forage	30	40	35	[26-27]
圈舍 House	提高清粪频率 Improve cleaning frequency	—	30	25	[28]
	刮粪板 Manure scraper	—	60	—	[17,29]
	漏缝地板 Slotted floor	—	—	10~50	[27]
	烘干粪便 Dry excrement	90	—	—	[26]
	垫草垫料 Bedding	35	20	50	[30]
	空气净化 Air purification 生物过滤 Bio filter	80	—	70~95	[26]
储存 Storage	加盖储存 Stamp storage	—	40~70	10~50	[17,28]
	密封存储 Sealed storage	—	80	60	[30]
利用 Manuring	粪肥注施 Manure injection	70	80	80	[31]
	软管带施 Flexible pipe	—	40~80	—	[31]

3　讨论与结论

本文以重庆市规模化畜禽养殖业为研究对象，估算了 2013 年重庆市规模化畜禽养殖氨排放量，并分析其空间分布特征，同时参考已有研究，提出适合重庆市规模化畜禽养殖氨排放的减排策略，从而较科学地为重庆市大气环境管理和规模化畜禽养殖污染防治提供科学依据及对策，研究结果如下：

2013 年重庆市规模化畜禽养殖业氨排放量为 17 102.92 t，排放强度为 0.21 t·km^{-2}，其中合川、丰都和潼南依次是重庆市畜禽养殖业氨排放最大的 3 个区县，其排放份额共占总排放量的 30.19%。研究结果小于其他学者对不同地区的研究[12-15]，主要因为本文研究对象为规模化畜禽养殖，不涉及散养和放牧的饲养方式，纳入计算的畜禽养殖数量少于其他研究，同时计算方法和氨排放系数选取的不同也会导致研究结果存在差异。从空间分布特征来看，璧山区是重庆市规模化畜禽养殖氨排放强度最大的区县，其排放强度为 1.17 t·km^{-2}。在全局空间区域上，重庆市规模化畜禽养殖空间分布存在显著的空间正相关，即氨排放量高或低的区县在空间上表现出明显聚集状态；局部自相关分析发现，有 4 个区县呈现“高-高”类型区，5 个区县呈现“低-低”类型区，没有出现“高-低”和“低-高”类型区。重庆市规模化畜禽养殖氨排放空间分布与五大功能区的战略相协调。

规模化生猪养殖是重庆市畜禽养殖业最大的氨排放贡献源，氨排放量为 9 538.63 t，占全市总排放量的 55.80%，其次是蛋鸡，其贡献率为 15.87%。不

同种类的畜禽，其排放的粪尿在圈舍、储存管理和后续利用(施肥)3 个阶段的氨排放量不同，圈舍和后续利用(施肥)两个阶段的排放量相对较大。通过回归分析发现控制奶牛养殖的氨排放量对 NH_3 减排起关键性作用，针对重庆市规模化畜禽养殖氨排放减排有低氮饲料喂养、圈舍改造、粪便加盖或密封储存以及粪肥注施等主要措施。

本文氨排放量估算具有一定的不确定性，主要原因来自两个方面[32]：一方面是源于活动水平的不确定性；另一方面排放因子和相关参数的选用会直接影响到估算结果的准确度，由于动物组成、动物年龄以及动物粪便储存形式的不同，NH_3 排放因子存在差异。本文排放因子主要参考《大气氨源排放清单编制技术指南》(试行)[21]，由于排放系数的本地化程度不足，本文估算结果具有一定的不确定性。建议今后多开展排放系数的本地化和精细化研究，更加准确全面地评估畜禽养殖氨排放量。同时，为更好地推进畜禽养殖业氨排放减排工作，也应当做好氨排放控制的基础研究，开展控制技术试验，制定相关政策文件，加强政府引导和扶持。本文氨排放减排策略基于国内外研究文献的对比得出，后续研究中将针对不同措施的减排效率进行进一步试验研究，从而使研究结果更可靠更具科学性。

参考文献 References

[1] Galloway J N, Zhao D W, Thomson V E, et al. Nitrogen mobilization in the United States of America and the People's Republic of China[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(10/11): 1551–1561

[2] Goebes M D, Strader R, Davidson C. An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(18): 2539–2550

[3] 林岩, 段雷, 杨永森, 等. 模拟氮沉降对高硫沉降地区森林土壤酸化的贡献[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 640–646
Lin Y, Duan L, Yang Y S, et al. Contribution of simulated nitrogen deposition to forest soil acidification in area with high sulfur deposition[J]. Environmental Science, 2007, 28(3): 640–646

[4] 杨志鹏. 基于物质流方法的中国畜牧业氨排放估算及区域比较研究[D]. 北京: 北京大学, 2008
Yang Z P. Estimation of ammonia emission from livestock in China based on Mass-flow Method and regional comparison[D]. Beijing: Peking University, 2008

[5] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 中国主要湖泊营养氮沉降临界负荷的研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(1): 54–58
Ye X M, Hao J M, Duan L, et al. On critical loads of nutrient nitrogen deposition for some major lakes in China[J]. Environmental Pollution and Control, 2002, 24(1): 54–58

[6] Skjøth C A, Hertel O. Ammonia emissions in Europe [M]// Viana M. Urban Air Quality in Europe. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 141–163

[7] Zhang Y, Dore A J, Ma L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(2): 490–501

[8] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1146–1151
Yin S S, Zheng J Y, Zhang L J, et al. Anthropogenic ammonia emission inventory and characteristics in the Pearl River Delta Region[J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1146–1151

[9] Huang X, Song Y, Li M M, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(1): GB1030

[10] European Environment Agency (EEA). Ammonia (NH3) emissions[R/OL]. [2014-01-29]. http://www.eea.europa. eu/data-and-maps/indicators/eea-32-ammonia-nh3-emissions-1/assessment-4

[11] US EPA. 2011 National emissions inventory, version 1 technical support document[R/OL]. [2013-12-04]. http://www.epa.gov/ttn/chief/net/2011nei/2011_neiv1_tsd_draft.pdf

[12] 董文煊, 邢佳, 王书肖. 1994~2006 年中国人为源大气氨排放时空分布[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1457–1463
Dong W X, Xing J, Wang S X. Temporal and spatial distribution of anthropogenic ammonia emissions in China: 1994–2006[J]. Environmental Science, 2010, 31(7): 1457–1463

[13] 董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1611–1617
Dong Y Q, Chen C H, Huang C, et al. Anthropogenic emissions and distribution of ammonia over the Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(8): 1611–1617

[14] 潘涛, 薛念涛, 孙长虹, 等. 北京市畜禽养殖业氨排放的分布特征[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(3): 159–162
Pan T, Xue N T, Sun C H, et al. Distribution characteristics of ammonia emission from livestock farming industry in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(3): 159–162

[15] 冯小琼, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省 2012 年人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 394–401
Feng X Q, Wang X R, He M, et al. A 2012-based anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 394–401

[16] Klimont Z, Winiwarter W. Integrated ammonia abatement-modelling of emission control potentials and costs in GAINS[R]. IR-11–027. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2011

[17] 张增杰, 张双, 韩玉花, 等. 农业源氨排放控制对策初步研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 439–442
Zhang Z J, Zhang S, Han Y H, et al. A preliminary study on the source of ammonia emissions control countermeasures of agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 439–442

[18] 沈兴玲, 尹沙沙, 郑君瑜, 等. 广东省人为源氨排放清单及

减排潜力研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 43–53
Shen X L, Yin S S, Zheng J Y, et al. Anthropogenic ammonia emission inventory and its mitigation potential in Guangdong Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(1): 43–53
[19] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 2014 重庆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014
Chongqing Statistic Bureau, National Bureau of Statistics Chongqing Investigation Corps. Chongqing Statistical Yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004
[20] 张灿, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区农业源氨排放研究[J]. 中国环境监测, 2014, 30(3): 90–96
Zhang C, Zhai C Z, Zhou Z E, et al. Research on ammonia emission from agricultural sources in Chongqing Urban City[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(3): 90–96
[21] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南[EB/OL]. [2014-08-19]. http://www.zhb. gov.cn/gkml/hbb/ bgg/201408/ W020140828351293771578.pdf
The Ministry of Environmental Protection. Atmospheric ammonia source emission inventory preparation of technical guidelines[EB/OL]. [2014-08-19]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf
[22] 周媛媛, 殷捷, 杨志敏, 等. 重庆市畜禽粪污的区域分布及其水环境响应特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 811–818
Zhou Y Y, Yin J, Yang Z M, et al. Regional distribution of livestock manure and response characteristics of water environment in Chongqing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 811–818
[23] Sokal R R, Thomson J D. Applications of spatial autocorrelation in ecology[M]//Legendre P, Legendre L. Developments in Numerical Ecology. Berlin Heidelberg: Springer, 1997: 431–466
[24] 成金华, 李悦, 陈军. 中国生态文明发展水平的空间差异与趋同性[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 1–9
Cheng J H, Li R, Chen J. Regional difference and convergence of ecological civilization level in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 1–9
[25] 杨志鹏, 栾胜基, 陈辽辽, 等. 养殖业氨排放清单模型进展及鸡的排放因子本地化[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6490–6493
Yang Z P, Luan S J, Chen L L, et al. Recent development of ammonia emission inventory model from livestock and the localization of emission factors of laying hen and broiler in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(15): 6490–6493
[26] Swensson C. Relationship between content of crude protein in rations for dairy cows, N in urine and ammonia release[J]. Livestock Production Science, 2003, 84(2): 125–133
[27] 李新建, 吕刚, 任广志. 影响猪场氨气排放的因素及控制措施[J]. 家畜生态学报, 2012, 33(1): 86–93
Li X J, Lü G, Ren G Z. Influencing factors of ammonia emissions from pig houses and mitigation techniques[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2012, 33(1): 86–93
[28] Martinez J, Oudot C, Portejoie S, et al. Reduction of ammonia emissions from livestock farming in France: An assessment of methods and elements for devising policy[J]. Simposion International Production Animal Sustensable, 2004, 45(3): 153–177
[29] 金书秦, 韩冬梅, 王莉, 等. 畜禽养殖污染防治的美国经验[J]. 环境保护, 2013, 41(2): 65–67
Jin S Q, Han D M, Wang L, et al. Livestock and poultry breeding pollution control experience of the United States[J]. Environment Protection, 2013, 41(2): 65–67
[30] Wang Y, Cho J H, Chen Y J, et al. The effect of probiotic BioPlus 2B® on growth performance, dry matter and nitrogen digestibility and slurry noxious gas emission in growing pigs[J]. Livestock Science, 2009, 120(1/2): 35–42
[31] Misselbrook T H, van der Weerden T J, Pain B F, et al. Ammonia emission factors for UK agriculture[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(6): 871–880
[32] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 15–20
Zhong L J, Zheng J Y, Lei G Q, et al. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: Methodology and case study[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(4): 15–20